

УДК 621.371

В.П. Деденок¹, С.М. Флерко², В.М. Дейнеко²¹Харківський центр Інституту космічних досліджень НАНУ-НКАУ, Харків²Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

РОЗРОБКА МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ ВИПАДКОВОЇ СКЛАДОВОЇ ІОНОСФЕРНОЇ ПОХИБКИ СУПУТНИКОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ ВИЗНАЧЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ДВОЧАСТОТНИХ ВИМІРІВ КОНТРОЛЬНО-КОРЕГУЮЧИХ СТАНЦІЙ

Запропоновано метод формування іоносферної корегуючої поправки до вимірів псевдодалекостей супутникової навігаційної апаратури. Проведено аналіз впливу іоносфери на виміри псевдодалекостей, представлена модель іоносферної похибки з урахуванням випадкової складової. Розроблено метод формування іоносферної корегуючої поправки, який на відміну від існуючих дозволяє компенсувати регулярну та мінімізувати випадкову складові іоносферної похибки супутникових навігаційних вимірювань

Ключові слова: іоносфера, електрона концентрація, випадкова складова іоносферної похибки.

Постановка проблеми

На сьогоднішній день існує велика кількість моделей, які дають уявлення о розподілі електронів в іоносферному шарі. Їх використання дозволяє визначити ступінь впливу іоносфери на розповсюдження радіосигналів. В супутниковій навігаційній апаратурі для компенсації іоносферної похибки використовується модель Клобушара (в одночастотній апаратурі) і двочастотний метод у двочастотній апаратурі. Двочастотний метод є найбільш точним способом компенсації іоносферної похибки, проте вартість двочастотного приймача перевищує вартість одночастотного приблизно у десять разів. Використання моделі Клобушара призводить до компенсації регулярної іоносферної похибки на 50% і взагалі не враховує вплив випадкової складової іоносферної похибки. Величина випадкової складової залежить від частоти сигналу і складає одиниці процентів від систематичної складової і може досягати значень від 2 до 4 метрів, а в деяких випадках більше десяти метрів, в періоди геомагнітних збурень коли регулярна складова іоносферної похибки може досягати значень сотні метрів [2]. Аналіз літератури показав [3, 5, 7, 8], що поки що не існує методи який би дозволяв би по вимірах контрольно – корегуючи станцій формувати іоносферну поправку, яка дозволяє корегувати випадкову складову. Тому **метою роботи** є розробка методу формування та компенсації іоносферної складової похибки, який би усував регулярну та мінімізував випадкову складові іоносферної похибки супутникових навігаційних вимірювань.

Результати досліджень

Іоносфера є нестационарною та суттєво неоднорідною по своїй просторовій структурі середовищем з широким спектром характерних просторових та часових масштабів. Структуру іоносфери

прийнято розподіляти на регулярну та нерегулярну частини. Регулярна частина охоплює неоднорідну великомасштабну структуру і може бути представлена як:

$$X_0 = X_0(t, h, \varphi, \lambda, \rho, nd),$$

де t – місцевий час; h – висота над поверхнею Землі; φ, λ – географічні широта і довгота; ρ – сонячна активність;

Добре відомо з експериментів [1], що як що отримано локальне значення якого-небудь параметру іоносфери X в якийсь момент часу, а X_0 середнє значення по простору і часу значення того же параметра, то під нерегулярною частиною параметру іоносфери X слід розуміти $\Delta X = X - X_0$. Який неможливо представити будь якою детермінованою моделлю, так як цей параметр є випадковим.

Таким чином, виміряні значення параметру іоносфери X можна викласти як:

$$X = X_0 + \Delta X,$$

де $X_0, \Delta X$ – регулярна та нерегулярна (випадкова) складові іоносфери відповідно.

Для визначення іоносферних похибок вимірів поточних навігаційних параметрів в якості параметру іоносфери X доцільно прийняти концентрацію електронів N_e вздовж траси розповсюдження навігаційного сигналу, так як інтегральне значення N_e визначає величину затримки (випередження) сигналу при проходженні його через шар іоносфери. В цьому випадку концентрація електронів представляє собою суперпозицію регулярної N_0 та нерегулярної ΔN складових, тобто:

$$N_e = N_0(h, \Phi) + \Delta N(h, \Phi),$$

де h – фіксована висота; Φ – геомагнітна широта.

У приведенному виразі $N_0(h, \Phi)$ відображає за-

лежність деякої загальної зміни електронної концентрації на фіксованій висоті від геомагнітної широти. У свою чергу, $\Delta N(h, \Phi)$ представляє собою відхилення від загального розподілення $N_0(h, \Phi)$ і включає в себе варіації, $N_0(h, \Phi)$ які обумовлені різними фізичними процесами. У зв'язку з тим, що розглядається обмежений інтервал широт, який має близькі структурно-морфологічні характеристики, нерегулярну складову розподілу можна вважати однорідним і ергодичним полем по широті і довготі. В цьому випадку можна розглядати нерегулярну складову як функцію одного параметру – висоти [1]. Проведений якісний аналіз показав, що флуктуації електронної концентрації $\Delta N(h)$ з достатньою ступінню точності можна представити нормальним законом розподілення [1]. Для рішення навігаційних задач більш важно знати інтегральну електронну концентрацію, так як тільки вона визначає ступінь впливу іоносфери на проведення навігаційних вимірів. В цьому випадку інтегральний закон розподілу буде являтися сумою законів розподілу, яким підчиняються окремі флуктуації $\Delta N(h)$ на кожній фіксованій висоті вздовж траси розповсюдження навігаційного сигналу. З теорії вірогідності відомо, що яким би законам розподілу не підпорядковувалися окремі елементарні похибки, особливості цих розподілів в сумі великої кількості складових нівелюються, і сума підпорядковується закону близькому до нормального [6]. Тим більше він буде нормальним, якщо йде сумування розподілів близьких до нормального.

При проходженні радіосигналу крізь іоносферний шар швидкість його розповсюдження відрізняється від швидкості світла у вакуумі, внаслідок чого виникає іоносферна похибка вимірів.

Розподіл структури іоносфери на регулярну і нерегулярну частини обумовлює наявність в іоносферній похибці систематичної і випадкової складових. Величина випадкової складової залежить від частоти сигналу і складає одиниці процентів від систематичної складової і може досягати значень від 2 до 4 метрів, а в деяких випадках і десятки метрів [2].

Очевидно, що у разі можливості врахування випадкової іоносфери, при формуванні поправки, це приведе до підвищення точності диференціальної корекції вимірювань споживача.

Початковими даними для реалізації методу формування поправки, з урахуванням випадкової іоносферної похибки, є результати двочастотних вимірювань іоносферних затримок, отримані від декількох рознесених у просторі контрольних станцій в дискретні моменти часу. На всіх контрольних станціях проводяться одночасні вимірювання іоносферних затримок, протягом деякого інтервалу часу $[t, t + \Delta t]$. При цьому дискретність вимірювань за-

звичай вибирають з умови $t_i \geq \tau_k$, де τ_k – інтервал часової кореляції випадкової іоносферної похибки, через що похибки можна вважати незалежними. Тривалість інтервалу кореляції для такої похибки складає, близько 20 секунд [2]. Оскільки іоносферна сума систематичної і випадкової складової, то результатом кожного вимірювання на i -й контрольній станції в j -й момент часу буде сума:

$$\hat{S}_{ij} = S_{c_{ij}} + \delta S_{ij} + \xi_{ij},$$

де $S_{c_{ij}}$ – систематична іоносферна похибка вимірів; δS_i – випадкова іоносферна похибка вимірів; ξ_{ij} – складова похибки, яка обумовлена шумами апаратури; $i=1, n$, n – кількість контрольних станцій, $j=1, k$, k – кількість відліків часу на інтервалі $[t, t + \Delta t]$.

При цьому вважається, що випадкова складова похибки δS_i розподілені по нормальному закону з нульовим середнім $\langle \delta S \rangle = 0$ і кореляційною матрицею $K_{\delta s} = \langle \delta S_{ij} \delta S_{ij}^T \rangle$, тобто $P(\delta S_{ij}) \rightarrow N(0, K_{\delta s})$.

Систематична складова іоносферної похибки вимірів може визначатися будь-якою існуючою моделлю іоносфери. Як правило, вони є функцією сонячної активності, сезоном року, місцевого часу, координат точки спостереження і других факторів. Або в загальному випадку можна прийняти, що систематична частина іоносфери залежить від деяких параметрів, тобто $S_c = \varphi(\Theta)$.

Отримані значення іоносферних затримок можуть бути об'єднані в масив \hat{S} :

$$\hat{S} = \|\hat{S}_{11} \dots \hat{S}_{1k} : \hat{S}_{21} \dots \hat{S}_{2k} : \hat{S}_{31} \dots \hat{S}_{3k} : \hat{S}_{n1} \dots \hat{S}_{nk}\|.$$

Результати вимірів розподілені згідно нормального закону з математичним очікуванням $\varphi(\Theta)$ і кореляційною матрицею $K(v)$:

$$P(\hat{S} / \Theta, v) = N(\varphi(\Theta), K(v)),$$

де v – параметри, які характеризують величину випадкової складової іоносфери.

Для реалізації роботи такого алгоритму необхідно зробити деякі допущення, що стосуються статистичних властивостей проведених вимірювань.

1. Передбачається, що систематична складова іоносфери, на кожній контрольній станції, не міняється з часом в межах інтервалу $[t, t + \Delta t]$, тобто $S_{c_{ij}} = S_{c_i}$, якщо $t_j \in [t, t + \Delta t]$.

З урахуванням цього допущення рівняння вимірів мережі КС можна записати у векторно-матричному вигляді:

$$\bar{S}_i = \bar{I} S_{c_i} + \bar{S}_{сл_i} + \bar{\xi}_i,$$

а виміри виконанні споживачем:

$$S_{\Pi} = R_0 + S_{\text{іс}} + S_{\text{ісл}} + \xi_{\Pi},$$

де $\vec{1}$ – одиничний вектор; R_0 – дійсна відстань "споживач – супутник"; S_{c_i} – систематична складова іоносферної похибки вимірів на i -й КС, які виміряні на інтервалі; $S_{\text{іс}}$ – систематична іоносферна похибка споживача; $S_{\text{ісл}}$ – випадкова іоносферна складова споживача; ξ_{Π} – похибка, шумів апаратури споживача; $\vec{S}_{\text{сл}_i} = \|S_{\text{сл}_1} \ S_{\text{сл}_2} \ S_{\text{сл}_3} \ \dots \ S_{\text{сл}_k}\|$ – вектор елементами, якого є величини випадкових складових іоносфери отриманих на i -й КС на інтервалі $[t, t + \Delta t]$; $\vec{\xi}_i = \|\xi_1 \ \xi_2 \ \xi_3 \ \dots \ \xi_k\|$ – вектор елементами, якого є складові похибок, які обумовлені шумами апаратури i -й КС на інтервалі $[t, t + \Delta t]$.

2. Всі виміри випадкової складової іоносфери, які виконанні на i -й КС на інтервалі часу $[t, t + \Delta t]$, характеризуються кореляційною матрицею K_1 :

$$K_1 = \langle (\vec{S}_i - \vec{1}S_{c_i})(\vec{S}_i - \vec{1}S_{c_i})^T \rangle = \vec{1}\sigma_j^2;$$

$$K_i = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_k^2 \end{pmatrix};$$

$$K_{\text{кс}} = \begin{pmatrix} \sigma_{i1}^2 & 0 & \dots & 0 & \sigma_{i1}^2\sigma_{21}^2P_{12} & 0 & \dots & 0 & \dots & \sigma_{i1}^2\sigma_{n1}^2P_{n1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{i2}^2 & \dots & 0 & 0 & \sigma_{i2}^2\sigma_{22}^2P_{12} & \dots & \vdots & \dots & 0 & \sigma_{i2}^2\sigma_{n2}^2P_{n1} & \dots & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 & \vdots & 0 & \ddots & 0 & \dots & \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \sigma_{ik}^2 & 0 & \dots & 0 & \sigma_{ik}^2\sigma_{2k}^2P_{12} & \dots & 0 & \dots & 0 & \sigma_{ik}^2\sigma_{nk}^2P_{n1} \\ \sigma_{21}^2\sigma_{i1}^2P_{21} & 0 & \dots & 0 & \sigma_{21}^2 & 0 & \dots & 0 & \dots & \sigma_{21}^2\sigma_{n1}^2P_{2n} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{22}^2\sigma_{i2}^2P_{21} & \dots & \vdots & 0 & \sigma_{22}^2 & \dots & \vdots & \dots & 0 & \sigma_{22}^2\sigma_{n2}^2P_{2n} & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 & \vdots & 0 & \ddots & 0 & \dots & \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \sigma_{2k}^2\sigma_{ik}^2P_{21} & 0 & \dots & 0 & \sigma_{2k}^2 & \dots & 0 & \dots & 0 & \sigma_{2k}^2\sigma_{nk}^2P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{n1}^2\sigma_{i1}^2P_{n1} & 0 & \dots & 0 & \sigma_{n1}^2\sigma_{21}^2P_{n2} & 0 & \dots & 0 & \dots & \sigma_{n1}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{n2}^2\sigma_{i2}^2P_{n1} & \dots & \vdots & 0 & \sigma_{n2}^2\sigma_{22}^2P_{n2} & \dots & \vdots & \dots & 0 & \sigma_{n2}^2 & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 & \vdots & 0 & \ddots & 0 & \dots & 0 & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \sigma_{nk}^2\sigma_{ik}^2P_{n1} & 0 & \dots & 0 & \sigma_{nk}^2\sigma_{2k}^2P_{n2} & \dots & 0 & \dots & 0 & \sigma_{nk}^2 \end{pmatrix}.$$

Таким чином завдання формування диференціальної поправки можна сформулювати таким чином: по сукупності результатів двочастотних вимірювань іоносфери, отриманих на різних КС протягом деякого інтервалу часу, необхідно сформувати корегуючу поправку, яка б компенсувала не тільки систематичну, але і випадкову складову іоносфери у вимірюваннях споживача.

Рішення поставленого завдання пропонується виконувати в два етапи. На першому етапі необхідно сформувати поправку до систематичної, на дру-

гому до випадкової складової іоносферної погрішності вимірювань.

3. Передбачається, що вимірювання, проведені на всіх КС в один і той же момент часу, корельовані між собою при цьому коефіцієнт кореляції залежатиме тільки від відстані між ними тобто:

$$K_2 = \langle (\vec{S}_i - \vec{1}S_{c_i})(\vec{S}_m - \vec{1}S_{c_m})^T \rangle = \sigma_i\sigma_m\rho_{im};$$

$$K_{im} = \begin{pmatrix} \sigma_{im}\sigma_{m1}\rho_{m1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{i2}\sigma_{m2}\rho_{m2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \sigma_{ik}\sigma_{mk}\rho_{mk} \end{pmatrix},$$

де σ_{ik}, σ_{mk} – середньоквадратичні відхилення вимірів, які виконанні на i -й та m -й КС в k -й момент часу відповідно; ρ_{im} – просторовий коефіцієнт кореляції i -й та m -й КС.

4. Випадкові складові іоносферних вимірів, які виконанні на різних КС у неспівпадаючі моменти часу, також є некорельованими тобто:

$$\langle (S_{ij} - S_{c_i})(S_{mk} - S_{c_m}) \rangle = 0.$$

Загальна кореляційна матриця вимірів виконаних на всіх КС $K_{\text{кс}} = \langle (\vec{S} - \vec{S}_c)(\vec{S} - \vec{S}_c)^T \rangle$ буде мати вигляд:

Для корекції систематичної складової вимірювань можна використовувати різні моделі іоносфера, які розрізняються по ступеню адекватності реальній іоносфері. У апаратурі одночастотного споживача для корекції іоносферної похибки використовується модель Клобушара яка, дозволяє компенсувати іоносферну похибку на 50 % [3]. Наприклад, в роботі [4] пропонується метод адаптивної компенсації іоносферних похибок, який також можна використовувати

ти для корекції систематичної складової вимірювань.

Формування поправки до випадкової складової іоносферної похибки вимірювань полягатиме у формуванні вектора вагових коефіцієнтів, який би впливав на вектор вимірювань мережі КС.

Вектор \bar{R} буде функцією невідомих нам елементів матриці K_{KC} і дисперсії вимірювань споживача σ_{Π}^2 . Тому для формування вектора \bar{R} необхідно подолати так звану "априорну невизначеність". Для цього слід провести набір статистики і використувати принципи "теорії адаптації" [5]. Оскільки координати КС наперед відомі, то інформацію про значення елементів кореляційної матриці K_{KC} можна отримувати до того, як необхідно скоректувати вимірювання споживача. Процес отримання оцінок матриці, K_{KC} згідно [5], називається "навчанням". Періодично, із заданим кроком, матрицю K_{KC} можна уточнювати по нових вимірюваннях мережі КС, тобто адаптувати елементи K_{KC} до реальних вимірювань.

Висновки

Таким чином, запропонований метод дозволяє усувати як регулярну так і нерегулярну похибки супутникових навігаційних вимірювань. Величина нерегулярної (випадковою) складової складає одиниці відсотків від регулярної. У періоди високої сонячної активності регулярна складова іоносферної похибки може досягати декількох десятків метрів. В цьому випадку для високоточних супутникових навігаційних застосувань досягти необхідних точностних характеристик можна за рахунок компенсації нерегулярної іоносферної складової.

Список літератури

1. Солодовников Г.К.. Распространение радиоволн в ионосфере в многомасштабной неоднородной ионосфере / Г.К. Солодовников, В.И. Новожилов, М.Н. Фаткулин. – М.: Наука, 1989. – 200 с.
2. Солодовников Г.К.. Дистанционное зондирование ионосферы Земли с использованием радиомаяков космических аппаратов / Г.К. Солодовников, В.М. Синельников, Е.Б. Крохмальников. – М.: Наука, 1988. – 191 с.
3. Харисов В.А. Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС / В.А. Харисов, А.И. Перов, В.А. Болдин. – М.: ИПРЖР, 1998. – 400 с.
4. Стратонович Р.Л. Принципы адаптивного приёма / Р.Л. Стратонович. – М.: Советское радио, 1973. – 144 с.
5. Котьякин С.И. Определение ионосферной задержки сигналов в одночастотной аппаратуре потребителей спутниковой системы навигации NAVSTAR / С.И. Котьякин // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – № 5. – С. 85-95.
6. Вентцель В.Е. Теория вероятностей / В.Е. Вентцель. – М.: Гос. Издательство физико-математической литературы, 1958. – 460 с.
7. Тучин Д.А. Кодовые измерения псевдодальности системы GPS. Модель ошибок и априорная оценка точности определения вектора положения / Д.А. Тучин. – М.: Российская Академия Наук, Ордена Ленина Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, 2002. – 17 с.
8. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д.Коллінз, пер. з англ. під ред. Я.С. Яцківа. – К.: Наукова думка, 1995. – 380 с.

Надійшла до редколегії 17.03.2009

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ СЛУЧАЙНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХЧАСТОТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНТРОЛЬНО-КОРРЕКТИРУЮЩИХ СТАНЦИЙ

В.П. Деденок, С.М. Флерко, В.М. Дейнеко

Предложен метод формирования ионосферной корректирующей поправки к измерениям псевдодальностей спутниковой навигационной аппаратуры. Проведен анализ влияния ионосферы на измерения псевдодальностей, представлена модель ионосферной погрешности с учетом случайной составляющей. Разработан метод формирования ионосферной корректирующей поправки, который в отличие от существующих позволяет компенсировать регулярную и минимизировать случайную составляющие ионосферной погрешности спутниковых навигационных измерений

Ключевые слова: ионосфера, электронная концентрация, случайная составляющая ионосферной погрешности.

DEVELOPMENT METHOD CORRECTION RANDOM COMPONENT IONOSPHERE ERROR SATELLITE NAVIGATION DEFINITION WITH USE TWO FREQUENCY MEASUREMENTS BASE STATION.

V.P. Dedenok, S.M. Flerko, V.M. Deineko

The method of forming of ionosphere correction is offered to measuring of pseudoranges of satellite navigation apparatus. The analysis of influencing of ionosphere is conducted on measurements of pseudoranges, the model of ionosphere error is presented taking into account a random component. The method of forming of ionosphere correction, which unlike existing allows to compensate regular and minimize random component of ionosphere error of the satellite measurements of navigations is developed.

Keywords: ionosphere, electronic concentration, random component ionosphere error.